

Strömungsmessungen an Lichtbögen und Plasmen zur Materialbearbeitung mittels PIV und LDA

J. Zosel¹, U. Guth¹, K. Dörner², J. Zschetzsche³, U. Füssel³

¹Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e.V. Meinsberg,
Fabrikstraße 69, 04720 Ziegra-Knobelsdorf

²Dantec Dynamics GmbH, Wetterkreuz 5, 91058 Erlangen

³Institut für Produktionstechnik, Technische Universität Dresden,
George-Bähr-Straße 3c, 01062 Dresden

Einleitung

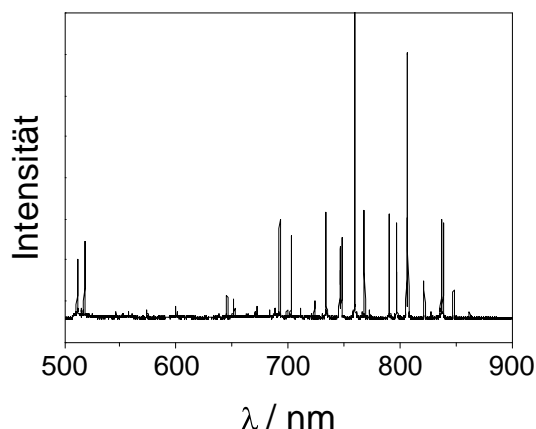
Das Ergebnis von Lichtbogen- und Plasmaprozessen zur Materialbearbeitung wird entscheidend vom Strömungsverhalten der Prozessgase bestimmt [1]. Von der Gasströmung beeinflusste Parameter sind beispielsweise die Ausbildung der Lichtbogensäule beim WIG-Schweißen oder Plasmaschweißen, porenfreie Nähte beim Schutzgasschweißen, die Bewegung von Pulverteilchen im Gasstrom beim thermischen Spritzen und die Fugenqualität beim Plasmaschneiden.

Bisher werden entsprechende Brenner aufgrund von Erfahrungen ausgelegt und anhand der erreichbaren Prozessqualität geometrisch optimiert. So erfolgen die Beobachtung des Werkstoffübergangs mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen [2] und die Beurteilung von Druckschwankungen mit der Messung akustischer Signale [3, 4]. Strömungsuntersuchungen werden selten und nur ohne Lichtbogen durchgeführt. Ziel der Arbeit war deshalb, die optischen Messverfahren LDA und PIV so anzupassen, dass Strömungen bei brennenden Lichtbögen bzw. Plasmen untersucht werden können, um einerseits Strömungen zu optimieren und andererseits Ausgangswerte für Simulationen zu gewinnen.

Die besondere Problematik bei der Anpassung optischer Strömungsmessverfahren für Lichtbogen- und Plasmaprozesse besteht in der hohen Lichtintensität am Messort, die ohne zusätzliche Vorkehrungen einen Nachweis des Streulichtes bzw. des reflektierten Lichts mit herkömmlichen Detektoren ausschließt.

Experimentelles

Verschiedene Brenner für das Schutzgasschweißen mit Wolframelektrode (WIG) und nachgeführter Drahtelektrode (MAG) sowie für das Plasmaschweißen wurden mittels LDA und PIV bei bewegtem Werkstück mit und ohne Lichtbogen untersucht. Für die LDA-Messungen wurde ein 1 Kanal-Rückstreuungssystem der Firma Dantec Dynamics



mit Argon-Ionen-Laser (100 mW, 514,5 nm) eingesetzt, wobei vor den Photomultiplikator ein Filter der Bandbreite 5 nm in den Strahlengang eingefügt wurde.

Die Unterdrückung der Lichtbogenstrahlung bei den PIV-Messungen an Schweiß- und Plasmabrennern (Beispiel in Abb. 1) erfolgte im Frequenzbereich durch Filter der Bandbreite 3 nm.

Abb. 1: Spektrum eines Argon-Plasmalichtbogens bei $I = 10 \text{ A DC}$

Das durch die Filter tretende Restlicht des Lichtbogens führt zur Überblendung von Bildern, die mit einer für PIV geeigneten CCD-Kamera mit Belichtungszeiten im μs -Bereich aufgenommen werden. Durch den Einsatz zweier PIV-Kameras, die von Dantec Dynamics für diese Anwendung optimiert und mit einem integrierten elektronischen Shutter ausgestattet wurden, konnten die ersten Bilder mit Belichtungszeiten $< 100 \text{ ns}$ aufgenommen und somit auch das Restlicht vollständig unterdrückt werden. Kameras, mit denen zwei Bilder mit diesen Belichtungszeiten im Abstand von wenigen μs aufgenommen werden können, stehen bislang nicht zur Verfügung. Das in Abb. 3 gezeigte Zeitregime verdeutlicht die Vorgehensweise für PIV-Messungen in Strömungsfeldern an Lichtbögen. Die weitgehende Übereinstimmung der beiden Kamerabilder ist Voraussetzung für die Anwendung des Korrelationsverfahrens zur korrekten Ermittlung der Geschwindigkeitsvektoren und wird durch die Justierung des Spiegels im Doppelkameramodul gemäß Abb. 2 erreicht. Für die PIV-Messungen wurden frequenzverdoppelte Pulse eines Nd-YAG-Lasers (120 mJ) mit der Dauer 10 ns und der Wellenlänge 532 nm eingesetzt.

Die Auswahl von Tracerpartikeln für die optischen Untersuchungen an brennenden Lichtbögen ist wegen der hohen Temperaturen im Lichtbogen und der hohen Beschleunigungen im Schutzgas in der Nähe des Lichtbogens problematisch. Einerseits müssen die Partikel für die Messung eine bestimmte Größe und dennoch ein gutes Folgevermögen aufweisen, andererseits können nur Materialien mit besonders hohem Schmelzpunkt eingesetzt werden, die den Schweißprozess nicht beeinflussen. Unter Abwägung aller Forderungen wurden für diese Untersuchungen MgO-Partikel mit $d \approx 4 \mu\text{m}$ verwendet, da Magnesiumoxid durch eine vergleichsweise geringe Dichte ($3,65 \text{ g/cm}^3$) und eine hohe Schmelztemperatur ($2640 \text{ }^\circ\text{C}$) gekennzeichnet ist und sich während des Schweißens nahezu prozessneutral verhält.

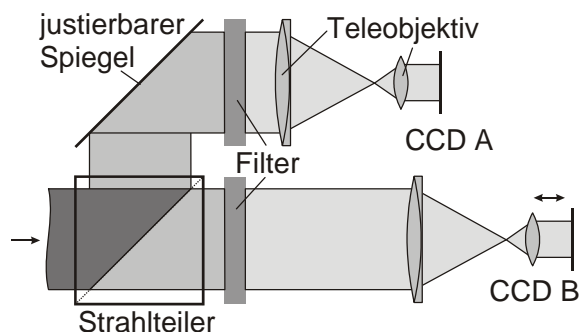


Abb. 2: Doppelkameramodul zur Aufnahme zweier Bilder mit kurzer Belichtungszeit

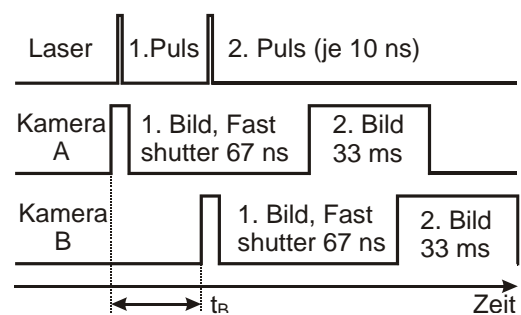


Abb. 3: Zeitregime für die PIV-Doppelaufnahmen im Zeitabstand t_R

Ergebnisse und Diskussion

LDA-Messungen in der Schutzgasströmung eines MAG-Schweißbrenners zeigen, dass der Volumenstrom im Schutzgasmantel ungleichmäßig im Bereich der Ausströmdüse verteilt ist (Abb. 4). Unter Einsatz eines schmalbandigen Filters und Abstimmung der Empfindlichkeit des Photomultiplikators konnten auch Mittelwerte bei brennendem Lichtbogen gewonnen werden, wobei im Lichtbogen selbst eine stark erhöhte Turbulenz beobachtet wurde. Die Ergebnisse deuten eine hohe Beschleunigung der Strömung im Bereich des Lichtbogens in Richtung Werkstück an. Bei der Beurteilung dieser Ergebnisse sind jedoch folgende Besonderheiten zu beachten:

- Die Gasströmung wird durch die Wärmeeinwirkung des Lichtbogens nach Austritt aus der Düse in hohem Maße beschleunigt. Es ist anzunehmen, dass die Tracerpartikel dieser beschleunigten Bewegung nicht vollständig folgen können.
- Die Messsignale aus dem inneren Bereich des Lichtbogens, der sich in Glockenform von der Drahtspitze bis zum Werkstück ausbildet (siehe auch Abb. 5, links), werden möglicherweise auch durch Intensitätsschwankungen beeinflusst. Die Tracerpartikel verdampfen oder dissoziieren im Lichtbogen, wobei dann die Ionen in Richtung der Lichtbogenachse beschleunigt werden.

Da die LDA wenig Rückschlüsse auf die zeitliche und räumliche Ausbildung von Wirbeln im Schutzgasstrom ermöglicht und die Herkunft der Signale aus dem Lichtbogen nicht vollständig bewertet werden konnte, wurden die Strömungsfelder an verschiedenen Schweißbrennern auch mit Hilfe der PIV charakterisiert.

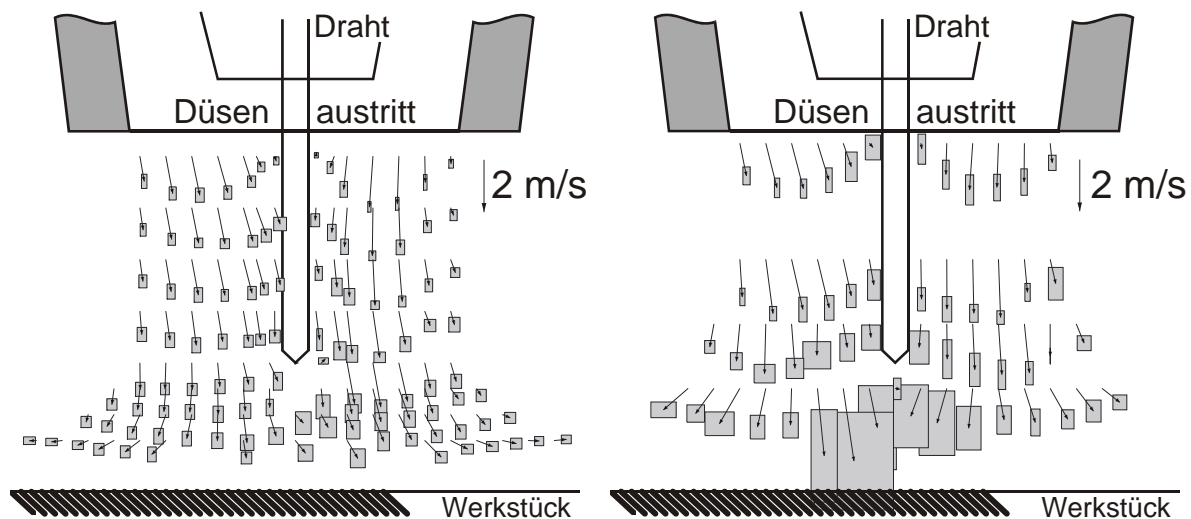


Abb. 4: Strömungsprofile in der Düsenströmung eines MAG-Schweißbrenners, links ohne Lichtbogen, rechts mit Lichtbogen, Düsenabstand 13 mm, Schutzgasstrom: 7,5 l/min, $I = 200$ A. Die Rechtecke geben die Standardabweichung der mittleren Geschwindigkeit an.

Die Dauer der maximalen Belichtungszeit bei den PIV-Messungen wurde experimentell ermittelt. Dabei zeigte sich, dass Belichtungszeiten von $t \geq 134$ ns bereits zu einer Überblendung der Partikel durch das Lichtbogensignal führen (Abb. 5).

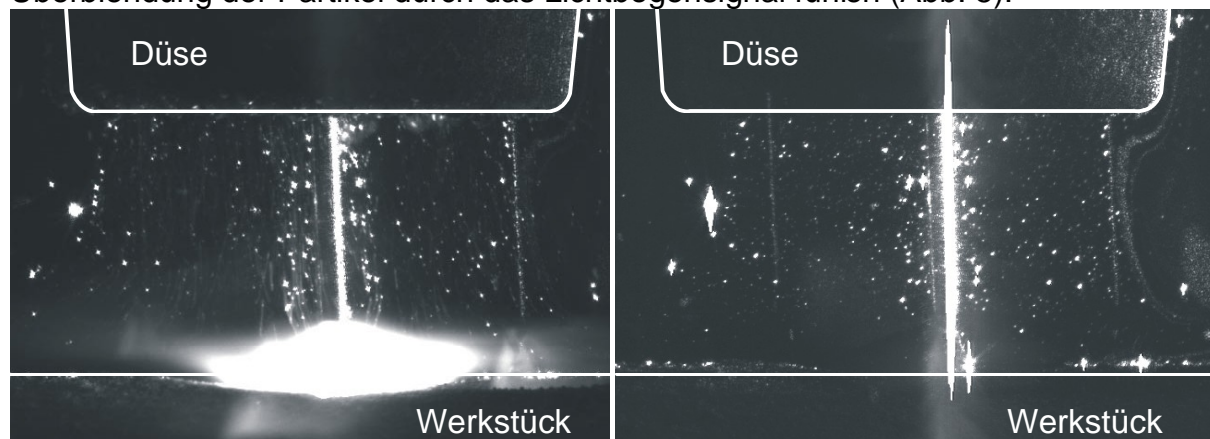


Abb. 5: PIV-Aufnahmen eines MAG-Brenners mit 200 A-Lichtbogen unter Einsatz von Filtern mit der Bandbreite 3 nm: links Belichtungszeit 134 ns, rechts Belichtungszeit 67 ns

Ebenso konnten ohne die Filter keine auswertbaren Bilder im Lichtbogen aufgenommen werden. Für die sichere Ausblendung sind demnach Begrenzungen der Lichtbogenstrahlung sowohl im Frequenzbereich als auch im Zeitbereich unumgänglich. Die Aufnahmen in Abb. 5 zeigen außerdem, dass die MgO-Tracerpartikel nur im Kernbereich des Lichtbogens verschwinden und die Schutzgasströmung um den Lichtbogen herum mit dieser Messmethode bestimmt werden kann.

Die in Abb. 6 und 7 aufgeführten Strömungsprofile wurden an einem MAG-Schweißbrenner mit verschiedenen Gasverteilern erhalten und belegen, dass das Design dieses Bauteils die Stabilität des Prozesses und damit den Schutzgasverbrauch entscheidend beeinflusst. Während der Gasverteiler Nr. 1 zu stabilen Schutzgasflanken führt, die auch bei pulsierendem Lichtbogen nicht beeinträchtigt werden, bilden sich bei Einsatz des Gasverteilers Nr. 2 Wirbel im Schutzgasstrom aus, durch die teilweise Außenluft in den Schutzgasstrom geführt wird. Dadurch entstehen unzulässige Poren in der Schweißnaht.

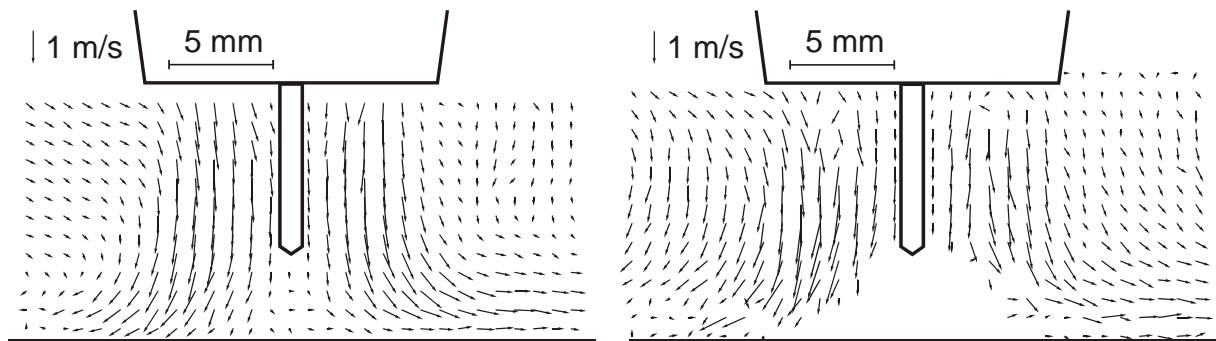


Abb. 6: PIV-Resultate an einem MAG-Brenner mit Gasverteiler Nr. 1, Mittelwerte aus 40 Aufnahmen, links: ohne Lichtbogen, rechts mit Lichtbogen 210 A, Schutzgas 18 Vol.-% CO₂ in Ar, $dV/dt = 8$ l/min

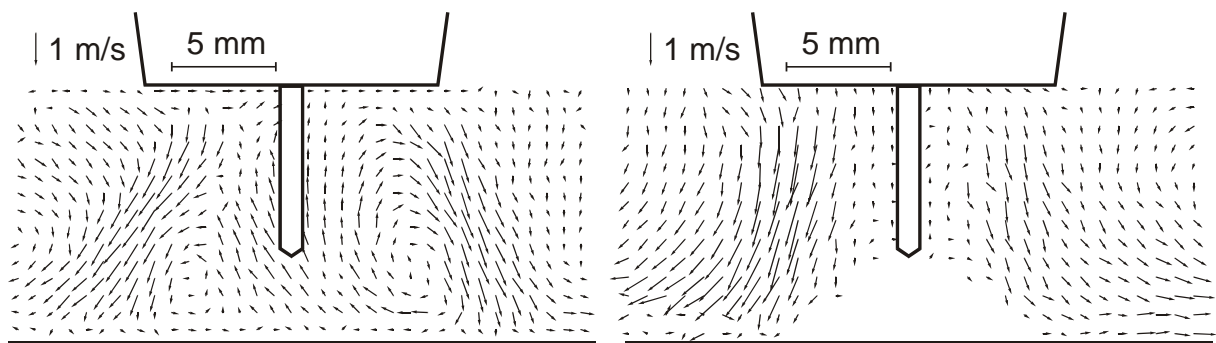


Abb. 7: PIV-Resultate an einem MAG-Brenner mit Gasverteiler Nr. 2, Mittelwerte aus 40 Aufnahmen, links: ohne Lichtbogen, rechts mit Lichtbogen 210 A, Parameter siehe Abb. 6

Um die Wechselwirkungen zwischen den Strömungsverhältnissen im Schutzgasmantel und der Stromstärke gezielt zu untersuchen, wurden PIV-Messungen beim WIG-Schweißen mit gepulstem Stromverlauf durchgeführt und die Strömungsfelder mit den Betriebsparametern Strom und Spannung korreliert. Bei diesen Untersuchungen zeigte sich, dass der Lichtbogen nach Anstieg des Entladestroms beginnt, am Elektrodenansatzpunkt in verstärktem Maß Gas anzusaugen und auf der Werkstückoberfläche dieses Gas auszustößen. Dieser Prozess ist weitgehend für bestimmte Instabilitäten beim Schutzgasschweißen verantwortlich, die durch zettliche Schwankungen

der Lichtbogenintensität verursacht werden. Aus dem in Abb. 8 gezeigten umrandeten Teil des Strömungsprofils sind in Abb. 9 zwei vergrößerte Abschnitte für zwei verschiedene Lichtbogenzustände dargestellt.

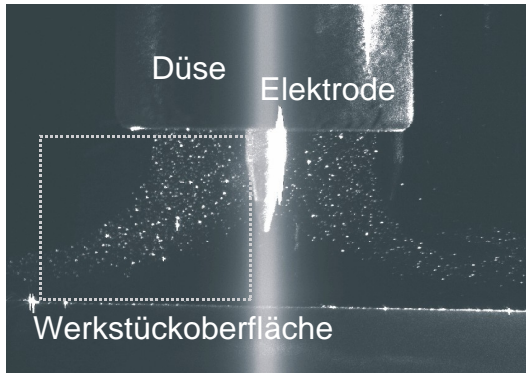


Abb. 8: Laserlichtschnitt durch den Lichtbogen eines WIG-Brenners bei 200 A Gleichstrom

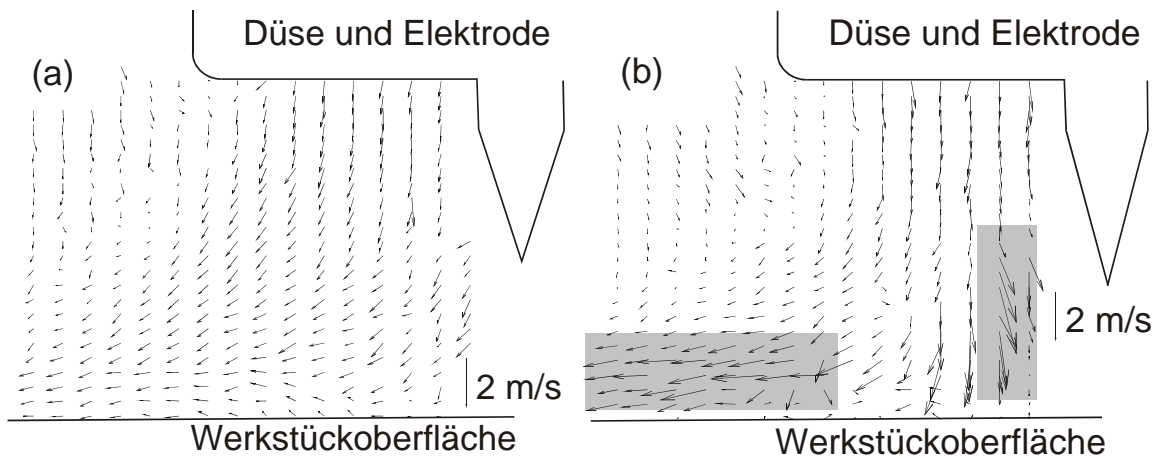


Abb. 9: Schutzgasströmung eines WIG-Brenners mit gepulstem Lichtbogen, (a): Grundstromphase $I = 20$ A, (b): Pulsstromphase $I = 200$ A, Schutzgasstrom: Ar, 9 l/min grau unterlegter Bereich: Pumpwirkung des Lichtbogens

Die in Abb. 9a aufgeführte Strömung bildet sich bei niedrigem Elektrodenstrom aus während die Strömung gemäß Abb. 9b bei hohem Elektrodenstrom gemessen wird. Die Vektoren in den grau unterlegten Bereichen belegen die Pumpwirkung des WIG-Lichtbogens.

Schlussfolgerungen

Strömungsmessungen an Lichtbögen von Schweiß- und Plasmaprennern können mittels LDA und PIV auch bei sehr lichtintensiven Entladungsplasmen durchgeführt werden, wenn der Lichteintritt in die Detektoren im Frequenz- und Zeitbereich durch den Einsatz schmalbandiger Filter bzw. geringer Belichtungszeiten begrenzt wird. Die Auswahl von Tracerpartikeln für die Messungen ist problematisch, da selbst oxidische Partikel mit hohem Schmelzpunkt im Lichtbogen verdampfen bzw. dissoziieren und andererseits in den engen Gaskanälen der Brenner akkumuliert werden können. Mit Hilfe von PIV wurde die räumliche und zeitliche Entstehung von Wirbeln dokumentiert, die zum Eindringen von Luftsauerstoff in den Schutzgasmantel führen und damit die Qualität der Schweißnaht beeinträchtigen können. Die Wirbelentstehung wird einerseits durch das Design von Brennerdüsen beeinflusst. Andererseits kann Luftsauerstoff auch durch Instabilitäten im Lichtbogen in den Schutzgasmantel

26.6

eindringen. Die vorgestellten Messmethoden sind für die Entwicklung neuer Brenner mit geringem Schutzgasverbrauch und die Gewinnung von Ausgangsdaten für entsprechende Simulationsrechnungen geeignet.

Danksagung

Die Autoren danken der Stiftung Industrieforschung für die Förderung des Projektes Nr. S559, sowie der TBi Industries GmbH & Co. KG, Fernwald, der Castolin GmbH, Kriftel, und der Dantec Dynamics GmbH, Erlangen, für die finanzielle Unterstützung und die intensive Kooperation.

Literatur

- [1] Schellhase, M.: Der Schweißlichtbogen – ein technologisches Werkzeug. Habilitation, TH Magdeburg, 1983
- [2] Rhee, S.; Kannatey-Asibu S.Jr.: Observation of metal transfer during gas metal arc welding. *Welding Journal*, New York, Band 71 (1992) Heft 10, Seite 381-386
- [3] Blumschein, E.: Dependence of sputter and sound on mode of the welding arc itself. Konferenz-Einzelbericht: JOM-9. Int. conf. on the joining of materials, Helsingör, DK, 16.-19.05.1999, (1999) Seite 292-297
- [4] Mansoor, A. M.; Huissoon, J. P.: GMA process identification using arc acoustics. Konferenz-Einzelbericht: 7. International conference on computer technology in welding, San Francisco, USA, 08.-11.07.1997, (1997) Seite 461-473